ISSN 2306-1677 (Print) ISSN 2518-7325 (On-line)
Отримано: 16.07.2026; Прийнято: 29.07.2026; Опубліковано: 30.12.2026;
УДК: 528.2/.3+ 528.88 http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.04.15

GNSS-ТЕХНОЛОГІЇ ТА СУПУТНИКОВА ГЕОДЕЗІЯ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

В. А. ФОМЕНКО
кандидат економічних наук, доцент кафедри геодезії,
землеустрою та земельного кадастру,
E-mail: ph.d.fomenko@gmail.com,
ORCID: 0009-0008-4815-0813
Одеський державний аграрний університет

Анотація. *У статті представлено наративний огляд сучасних підходів до застосування глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) у геодезії та геопросторовому забезпеченні. Метою роботи є узагальнення сучасних технологій високоточного супутникового позиціонування та визначення перспектив їх використання в умовах цифрової трансформації геодезичної галузі. Для проведення огляду проаналізовано наукові публікації та офіційну документацію, присвячені технологіям Real-Time Kinematic (RTK), Network RTK (NRTK), Precise Point Positioning (PPP), PPP-RTK, State Space Representation (SSR), сервісу Galileo High Accuracy Service (HAS), а також інтеграції GNSS із безпілотними літальними апаратами та геоінформаційними системами. Аналіз охоплював сучасні підходи до високоточного позиціонування, використання багатосистемних і багаточастотних GNSS-спостережень, питання цілісності й автентичності навігаційних сигналів та перспективи розвитку супутникових сервісів високоточного позиціонування.*

У результаті аналізу систематизовано основні характеристики технологій RTK, NRTK, PPP та PPP-RTK за критеріями точності, часу збіжності, потреби в наземній референцній інфраструктурі, просторового охоплення та придатності до роботи в різних умовах спостережень. Встановлено, що RTK і NRTK забезпечують оперативне отримання високоточних координат за наявності доступу до референцної інфраструктури, тоді як PPP характеризується більшою незалежністю від локальних базових станцій, але потребує тривалішого часу збіжності. Технологія PPP-RTK поєднує переваги глобального покриття PPP із прискореним отриманням високоточного координатного рішення завдяки використанню додаткових корекцій. Показано, що досягнення сантиметрової або міліметрової точності залежить від характеристик приймального обладнання, тривалості спостережень, кількості та геометрії супутників, якості корекцій і методики опрацювання даних.

Визначено, що перспективними напрямами розвитку GNSS-технологій є використання сервісу Galileo HAS, SSR-корекцій, інтеграція супутникового позиціо-

Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

нування з безпілотними літальними апаратами, геоінформаційними системами та іншими сенсорними технологіями, а також застосування методів машинного навчання для підвищення надійності координатних визначень. Результати дослідження можуть бути використані для вибору оптимальної технології високоточного GNSS-позиціонування залежно від вимог до точності, умов виконання геодезичних робіт і доступності референцної інфраструктури.

Ключові слова: *GNSS-технології, супутникова геодезія, GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou, RTK, Network RTK, PPP, PPP-RTK, SSR-корекції, Galileo HAS, високоточне позиціонування, геопросторові дані.*

Актуальність

Сучасний розвиток геодезії нерозривно пов'язаний із широким використанням глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), які є основою високоточного координатного забезпечення в геодезії, картографії, кадастрі, будівництві, моніторингу інженерних споруд та інших сферах. Зростання вимог до точності, оперативності та надійності координатних визначень зумовлює необхідність удосконалення технологій високоточного супутникового позиціонування та обґрунтування умов їх ефективного застосування.

Попри значну кількість досліджень, присвячених окремим технологіям GNSS-позиціонування, у науковій літературі недостатньо узагальнено результати їх порівняльної оцінки. Зокрема, потребують систематизації сучасні підходи до застосування RTK, Network RTK, Precise Point Positioning (PPP) і PPP-RTK, а також аналіз новітніх напрямів розвитку, пов'язаних із використанням State Space Representation (SSR)-корекцій, сервісу Galileo High Accuracy Service (HAS), багатосистемних і багаточастотних спостережень. Недостатньо дослідженими залишаються питання вибору оптимальної технології залежно від вимог до точності, умов спостережень і доступності референцної інфраструктури [1].

Метою роботи є проведення структурованого наративного аналізу сучасних наукових публікацій щодо розвитку високоточного GNSS-позиціонування, порівняння технологій RTK, Network RTK, PPP і PPP-RTK, а також узагальнення сучасних тенденцій розвитку супутникової геодезії та перспектив використання новітніх сервісів високоточного позиціонування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що основними напрямами розвитку глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) є вдосконалення технологій Precise Point Positioning (PPP), Real-Time Kinematic (RTK), Network RTK (NRTK) та PPP-RTK. Дослідження демонструють перехід від використання окремих методів позиціонування до багатосистемних і багаточастотних рішень, у яких одночасно враховуються точність, час отримання координатного рішення, доступність корекцій і стійкість до зовнішніх впливів [2].

У більшості публікацій PPP-RTK розглядається як перспективний напрям розвитку високоточного позиціо-

нування, оскільки ця технологія поєднує переваги PPP та RTK і забезпечує скорочення часу збіжності завдяки використанню точних орбітальних, часових і атмосферних корекцій. Водночас автори зазначають, що ефективність PPP-RTK залежить від способу формування корекцій, характеристик супутникового угруповання та доступності відповідних сервісів [3].

Аналіз джерел показує, що Network RTK забезпечує розширення зони високоточного позиціонування завдяки використанню мереж постійно діючих референцних станцій. При цьому основними чинниками ефективності NRTK визначено щільність референцної мережі, надійність телекомунікаційної інфраструктури та безперервність передачі корекцій [4].

Окремий блок досліджень присвячений багатосистемним і багаточастотним GNSS-спостереженням. Автори відзначають, що одночасне використання GPS, Galileo, BeiDou та GLONASS підвищує доступність супутникових спостережень і покращує геометрію супутникового угруповання, тоді як багаточастотні вимірювання сприяють ефективнішому усуненню іоносферних похибок. Разом із тим наголошується, що точність координатних визначень залежить не лише від кількості супутників, а й від умов приймання сигналів, їх геометрії та багатопроменевого поширення [5].

У сучасній літературі значна увага приділяється забезпеченню надійності GNSS-позиціонування в умовах складного середовища. Дослідження зосереджені на інтеграції GNSS з інерціальними навігаційними системами (INS), LiDAR та іншими сенсорами, а також на розробленні методів виявлення аномальних спостережень і контролю цілісності навігаційного рішення.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із застосуванням методів машинного навчання для обробки GNSS-даних. Наукові праці демонструють можливість використання алгоритмів штучного інтелекту для виявлення аномалій, класифікації умов поширення сигналів і моделювання багатопроменевих похибок, хоча їх ефективність суттєво залежить від характеристик навчальних вибірок і умов експлуатації [6].

Також значна кількість публікацій присвячена використанню GNSS для моніторингу деформацій земної поверхні та інженерних споруд. Автори відзначають ефективність RTK для оперативних вимірювань і PPP для довготривалих спостережень, підкреслюючи, що достовірність результатів визначається стабільністю часових рядів і якістю математичної обробки даних [7].

Водночас аналіз літератури показав недостатню кількість узагальнювальних досліджень, присвячених комплексній оцінці надійності GNSS-інфраструктури, порівняльному аналізу сучасних технологій високоточного позиціонування та використанню новітніх сервісів, зокрема SSR-корекцій і Galileo High Accuracy Service (HAS), в умовах обмеженої референцної інфраструктури та підвищених безпекових ризиків [8].

Мета даного дослідження. є проведення наративного огляду сучасного стану та перспектив розвитку технологій глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) у супутниковій геодезії, а також комплексний порівняльний аналіз основних методів високоточного позиціонування – Real-Time Kinematic (RTK), Network

RTK, Precise Point Positioning (PPP) та PPP-RTK. Особливу увагу приділено оцінюванню зазначених методів за критеріями точності, часу збіжності координатного рішення, потреби в референцній інфраструктурі, зони покриття, доступності та затримки корекцій, можливості роботи в режимі реального часу й стійкості до складних умов спостережень.

Окремим завданням дослідження є узагальнення сучасних підходів до використання багатосистемних і багаточастотних GNSS-спостережень, State Space Representation (SSR), Galileo High Accuracy Service (HAS), а також аналіз ролі технологій забезпечення цілісності та автентифікації навігаційних сигналів у підвищенні надійності координатних рішень. Дослідження також спрямоване на визначення впливу атмосферних похибок, багатопроменевого поширення сигналів, міської забудови, радіоперешкод та інших чинників на якість GNSS-позиціонування.

Матеріали і методи дослідження

Дослідження виконано у форматі структурованого наративного огляду (structured narrative review), спрямованого на узагальнення сучасного стану та перспектив розвитку глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) у супутниковій геодезії, а також на порівняльне оцінювання основних технологій високоточного позиціонування. Структурований наративний огляд обрано з огляду на комплексний характер дослідження, яке охоплює технології Real-Time Kinematic (RTK), Network RTK (NRTK), Precise Point Positioning (PPP), PPP-RTK, багатосистемні та багаточастотні GNSS-спостереження, State Space Representation (SSR), Galileo High Accuracy Service (HAS), питання цілісності та автентифікації навігаційних сигналів, а також інтеграцію GNSS з інерціальними навігаційними системами (INS), безпілотними літальними апаратами, LiDAR, геоінформаційними системами та методами машинного навчання [9].

Матеріалами дослідження слугували рецензовані наукові публікації вітчизняних і зарубіжних авторів, оглядові та експериментальні дослідження, офіційна технічна документація міжнародних GNSS-сервісів, нормативно-технічні матеріали та відкриті науково-інформаційні ресурси. Пошук наукових джерел проводився у базах даних Scopus та Web of Science Core Collection, а також у Google Scholar. Для уточнення технічних характеристик супутникових систем і сервісів високоточного позиціонування додатково опрацьовувалися офіційні матеріали Європейського космічного агентства (ESA), Європейського агентства з питань космічної програми (EUSPA) та офіційні інформаційні ресурси Galileo.

Пошук джерел здійснювався за допомогою комбінацій ключових слів: «GNSS», «Global Navigation Satellite Systems», «RTK», «Real-Time Kinematic», «Network RTK», «NRTK», «Precise Point Positioning», «PPP», «PPP-RTK», «State Space Representation», «SSR corrections», «Galileo High Accuracy Service», «Galileo HAS», «GNSS integrity», «GNSS authentication», «GNSS jamming», «GNSS spoofing», «GNSS multipath», «NLOS GNSS», «GNSS/INS integration», «GNSS machine learning» та «high-precision GNSS positioning». У пошукових стратегіях

використовувалися логічні оператори AND та OR, що дозволило поєднувати загальні та спеціалізовані терміни відповідно до тематики дослідження.

Основний часовий інтервал пошуку охоплював наукові публікації та технічні матеріали, опубліковані у період з 2015 по 2026 рік. Вибір цього періоду зумовлений необхідністю охоплення сучасного етапу розвитку багатосистемних і багаточастотних GNSS-технологій, PPP-RTK, SSR-корекцій, сервісів високоточного позиціонування та інтелектуальних методів обробки супутникових спостережень. Водночас окремі фундаментальні праці, опубліковані до 2015 року, включалися до аналізу у випадках, коли вони мали принципове значення для розуміння теоретичних і методологічних основ RTK, NRTK, PPP або PPP-RTK.

Процедура відбору джерел складалася з чотирьох послідовних етапів. На першому етапі здійснювалася ідентифікація публікацій за ключовими словами та пошуковими запитами. На другому етапі проводилося видалення дубльованих записів і попередній аналіз назв та анотацій. На третьому етапі виконувалася оцінка повних текстів публікацій на відповідність визначеним критеріям включення та виключення. На четвертому етапі відібрані джерела групувалися за тематичними напрямами та використовувалися для порівняльного й наративного аналізу [10].

До аналізу включалися джерела, які відповідали хоча б одному з таких критеріїв: розглядали технології RTK, NRTK, PPP або PPP-RTK; аналізували багатосистемні чи багаточастотні GNSS-спостереження; досліджували SSR-корекції або Galileo HAS; містили оцінювання точності, часу збіжності, доступності або надійності координатних рішень; аналізували вплив іоносферних і тропосферних затримок, багатопроменевого поширення сигналів, NLOS-сигналів та інших джерел похибок; розглядали питання цілісності та автентифікації GNSS-сигналів, впливу jamming і spoofing; або були присвячені інтеграції GNSS з INS, LiDAR, БПЛА, GIS та методами машинного навчання.

Критеріями виключення були: дубльовані публікації; джерела, що не відповідали тематиці високоточного GNSS-позиціонування; матеріали без достатнього опису методики або результатів дослідження; публікації, у яких GNSS використовувався лише як допоміжний інструмент без оцінювання характеристик позиціонування; а також неперевірені інформаційні ресурси без встановленого авторства або офіційного статусу. Для визначення технічних характеристик GNSS-сервісів використовувалися офіційні документи відповідних операторів і організацій, а для оцінювання фактичної точності та практичної ефективності технологій перевага надавалася рецензованим міжнародним науковим публікаціям.

Загалом у процесі пошуку було ідентифіковано 186 інформаційних записів. Після видалення 34 дубльованих записів та проведення первинного аналізу назв і анотацій для повнотекстового опрацювання відібрано 152 джерела. За результатами оцінювання повних текстів критеріям дослідження відповідали 86 джерел, які були включені до остаточного наративного аналізу. Серед них 68 становили рецензовані наукові публікації, 10 – оглядові наукові роботи, а 8 – офіційні технічні та інформаційні матеріали міжнародних GNSS-сер-

вісів. Відібрані джерела були розподілені за тематичними напрямами: методи RTK та NRTK; PPP та PPP-RTK; багатосистемні та багаточастотні технології; SSR-корекції та Galileo HAS; точність і час збіжності; GNSS у складних умовах; цілісність та автентифікація сигналів; jamming і spoofing; інтеграція GNSS з INS та іншими сенсорними системами; застосування машинного навчання для обробки GNSS-даних.

Для кожного відібраного джерела аналізувалися рік публікації, тип джерела, досліджувана GNSS-технологія, супутникові системи та частотні діапазони, метод позиціонування, умови проведення спостережень, тип використаних корекцій, точність координатних визначень, час збіжності, тривалість спостережень, тип референцної інфраструктури, наявність каналів передачі корекцій та основні обмеження технології. Такий підхід забезпечив можливість порівнювати результати досліджень, отримані в різних експериментальних і практичних умовах.

Порівняльний аналіз RTK, NRTK, PPP та PPP-RTK проводився за єдиною аналітичною матрицею, яка включала такі критерії: точність позиціонування; час збіжності; можливість роботи в режимі реального часу; потреба в локальній або мережевій референцній інфраструктурі; зона просторового покриття; тип і спосіб передачі корекцій; затримка корекцій; залежність від телекомунікаційної інфраструктури; стійкість до втрати зв'язку; вимоги до користувацького обладнання; стійкість до багатопроменевого поширення сигналів та міського середовища; можливість застосування для високоточного моніторингу деформацій і геодезичних робіт.

Результати дослідження та їх обговорення

Проведений структурований наративний аналіз 86 наукових та офіційних джерел засвідчив, що сучасний розвиток глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) характеризується переходом від використання окремих технологій супутникового позиціонування до комплексних багатосистемних і багаточастотних рішень. Основними напрямами розвитку є вдосконалення технологій Real-Time Kinematic (RTK), Network RTK (NRTK), Precise Point Positioning (PPP) та PPP-RTK, поширення State Space Representation (SSR)-корекцій, впровадження сервісів високоточного позиціонування, зокрема Galileo High Accuracy Service (HAS), а також інтеграція GNSS з інерціальними навігаційними системами (INS), геоінформаційними технологіями, безпілотними літальними апаратами, LiDAR і методами машинного навчання.

Порівняльний аналіз показав, що технології RTK, NRTK, PPP та PPP-RTK мають різні сфери застосування, які визначаються вимогами до точності, часу отримання координатного рішення, просторового охоплення, доступності референцної інфраструктури та каналів передачі корекцій. RTK забезпечує оперативне високоточне позиціонування для локальних геодезичних робіт, однак залежить від наявності базової станції та стабільності передачі диференційних поправок. NRTK розширює можливості RTK завдяки використанню мережі постійно діючих референцних станцій, забезпечуючи високу точність на значних територіях, проте його ефективність визначаєть-

ся якістю мережевої та телекомунікаційної інфраструктури.

На відміну від RTK і NRTK, технологія PPP забезпечує високоточне позиціонування без прив'язки до локальної базової станції, хоча характеризується тривалішим часом збіжності. PPP-RTK поєднує переваги PPP із можливістю швидшого отримання високоточного координатного рішення завдяки використанню додаткових супутникових та атмосферних корекцій, що робить її одним із найперспективніших напрямів розвитку високоточного позиціонування.

Для узагальнення результатів порівняльного аналізу сформовано аналітичну матрицю основних технологій високоточного GNSS-позиціонування.

Порівняльний аналіз показав, що точність GNSS-технологій не є сталою величиною і залежить від умов спостережень. Сантиметровий або міліметровий рівень точності визначається характеристиками GNSS-приймача, геометрією супутникового угруповання, кількістю використаних частот, тривалістю спостережень, атмосферними умовами, багатопроменевістю сигналів, якістю корекцій та методикою обробки даних. Тому результати різних досліджень доцільно порівнювати лише з урахуванням експериментальних умов і застосованих статистичних критеріїв.

Для оперативних геодезичних робіт RTK і NRTK забезпечують швидке отримання високоточного координат-

1. Матриця основних технологій високоточного GNSS-позиціонування

Критерії	RTK	Network RTK (NRTK)	PPP	PPP-RTK
Принцип позиціювання	Відносне позиціонування відносно базової станції	Мережеве відносне позиціонування	Абсолютне високоточне позиціонування	Абсолютне позиціонування з високоточними корекціями
Основний тип корекцій	Диференційні поправки	Мережеві поправки та моделі похибок	Точні орбіти та супутникові годинники	Точні орбіти, годинники, атмосферні та додаткові корекції
Просторове охоплення	Локальне	Регіональне	Глобальне або широкорегіональне	Регіональне або широкорегіональне
Потреба в базовій станції	Висока	Використовується мережа станцій	Безпосередня близькість не потрібна	Безпосередня близькість не потрібна
Час отримання високоточного рішення	Короткий за сприятливих умов	Короткий за доступності корекцій	Відносно тривалий час збіжності	Скорочений порівняно з традиційним PPP
Робота в реальному часі	Так	Так	Можлива за відповідної реалізації	Так, за наявності оперативних корекцій
Залежність від телекомунікацій	Висока	Висока	Залежить від способу отримання корекцій	Висока в режимі реального часу
Основна перевага	Висока оперативність	Висока точність у межах мережевого покриття	Велика зона покриття	Поєднання широкого покриття та швидкої збіжності
Основне обмеження	Локальна зона застосування	Залежність від мережі станцій і зв'язку	Тривала збіжність	Складність формування та доставки корекцій

ного рішення, тоді як PPP є ефективним для довготривалих спостережень без необхідності використання локальної базової станції. Технологія PPP-RTK поєднує переваги широкого просторового охоплення з можливістю скорочення часу збіжності. Отже, вибір технології має базуватися на комплексній оцінці точності, часу отримання результату, доступності інфраструктури та умов проведення спостережень.

Аналіз розвитку багатосистемних і багаточастотних GNSS-технологій засвідчив, що одночасне використання GPS, Galileo, BeiDou та GLONASS підвищує доступність супутникових спостережень, покращує геометрію супутникового угруповання та надійність позиціонування, особливо в умовах міської забудови й складного рельєфу. Використання багаточастотних сигналів також сприяє ефективнішому усуненню іоносферних похибок і прискоренню вирішення фазових неоднозначностей.

Встановлено, що SSR-корекції є одним із перспективних напрямів розвитку високоточного позиціонування, оскільки забезпечують передачу окремих компонентів похибок GNSS-рішення та створюють можливості для масштабування точного позиціонування на великі території. Перспективним прикладом реалізації такого підходу є Galileo High Accuracy Service (HAS), який розширює доступність високоточних корекцій без обов'язкового використання локальної референцної мережі. Водночас ефективність HAS залежить від сумісності обладнання, якості приймання сигналів і доступності корекцій, тому цей сервіс доцільно розглядати як доповнення до RTK і NRTK, а не їх повну заміну.

Висновки і перспективи

У результаті проведеного структурованого наративного аналізу наукових публікацій та офіційної документації встановлено, що ефективність використання сучасних технологій високоточного GNSS-позиціонування визначається комплексом технічних і організаційних чинників, серед яких ключове значення мають вимоги до точності, оперативності отримання координат, доступність референцної інфраструктури та умови виконання геодезичних робіт. Обґрунтовано, що технології RTK, Network RTK (NRTK), Precise Point Positioning (PPP) та PPP-RTK мають різні сфери ефективного застосування: RTK і NRTK є найбільш придатними для оперативних локальних вимірювань, тоді як PPP і PPP-RTK забезпечують перспективи високоточного позиціонування на значних територіях із меншою залежністю від локальних мереж базових станцій. Встановлено, що досягнення сантиметрової або міліметрової точності GNSS-вимірювань можливе лише за дотримання визначених умов спостережень, а вирішальний вплив на кінцеву точність мають характеристики приймального обладнання, геометрія супутникового угруповання, тривалість спостережень, атмосферні впливи та якість застосовуваних корекцій. Визначено, що використання багатосистемних і багаточастотних GNSS-приймачів є одним із головних напрямів підвищення ефективності супутникової геодезії, оскільки забезпечує покращення доступності супутникових спостережень, надійності координатних визначень і скорочення часу отримання фіксованого рішення. Також встановлено, що впровадження SSR-корекцій та сервісу Galileo High

Accuracy Service (HAS) є перспективним напрямом розвитку глобального високоточного позиціонування, оскільки розширює можливості масштабування точних координатних визначень і підвищує доступність сучасних GNSS-технологій без обов'язкової прив'язки до локальних мереж референцних станцій.

Список використаної літератури

1. Куницька М. С. GNSS-моніторинг деформацій бортів кар'єрів при розробці родовищ нерудних корисних копалин. *Технічна інженерія.* 2025. № 2(96). С. 226–230. URL: https://ten.ztu.edu.ua/article/view/348269 (дата звернення: 10.07.2026).
2. Коренець О., Лукіянчук А. І. Аналіз сучасного стану розвитку мереж ГНСС-спостережень. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки.* 2024. № 2(58). С. 62–67. URL: https://military.bulletin.knu.ua/uk/article/view/6781 (дата звернення: 10.07.2026).
3. Лазоренко Н. Дослідження застосування штучного інтелекту (GeoAI) для завдань топографічного картографування. Просторовий розвиток. 2024. № 8. С. 430–443. URL: https://spd.knuba.edu.ua/article/view/315533 (дата звернення: 10.07.2026).
4. Побігайло Д. П., Іськов С. С. Сучасні методи покращення точності GPS-позиціонування. *Технічна інженерія.* 2024. № 1(93). С. 415–419. URL: https://ten.ztu.edu.ua/article/view/308150 (дата звернення: 10.07.2026).
5. Шевчук С., Домашенко Г., Рожі Т. Сучасні методи геодезичного картографування територій: використання GPS та ГНСС технологій. *Просторовий розвиток.* 2024. № 8. С. 506–517. URL: https://spd.knuba.edu.ua/article/view/315889 (дата звернення: 10.07.2026).
6. Parakhnenko V., Honcharuk V., Balabak O., Dekarchuk M., Dekarchuk S., Borovyk P., Shemiakin M. Assessment of the ecological safety of the Ukrainian Polissya region based on landscape-ecological and radioecological approaches under martial law. *Environmental Problems*. 2026. Vol. 11, No. 1. P. 50–60. URL: https://science.lpnu.ua/ep/all-volumes-and-issues/volume-11-number-1-2026/assessment-ecological-safety-ukrainian-polissya (дата звернення: 10.07.2026).
7. Brusak I. V. New challenges for exploitation of continuously operating reference GNSS stations during hostilities. Case study of Ukraine. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2024. № 237. URL: https://science.lpnu.ua/jgd/all-volumes-and-issues/2372024/new-challenges-exploitation-continuously-operating-reference (дата звернення: 10.07.2026).
8. Tretyak K., Brusak I., Babchenko V. Recent deformations of the Earth's crust in Ukraine based on GNSS network data from GEOTERRACE and SYSTEM.NET. *Геодинаміка*. 2024. Vol. 37, No. 2. P. 56–68. URL: https://science.lpnu.ua/jgd/all-volumes-and-issues/2372024/recent-deformations-earths-crust-ukraine-based-gnss-network-data (дата звернення: 10.07.2026).
9. Даншина С., Андрєєв С., Горелик С., Нечаусов А., Прийма А. Геоінформаційні технології для інженерно-геодезичних вишукувань у процесі модернізації залізничної інфраструктури України. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості.* 2024. № 4(30). С. 39–58. URL: https://www.itssi-journal.com/index.php/ittsi/article/view/524 (дата звернення: 10.07.2026).
10. Yasyukevich Y. V., Zhang B., Devanaboyina V. R. Advances in GNSS Positioning and GNSS Remote Sensing. Sensors. 2024. Vol. 24, No. 4. Article 1200. URL: https://www.

mdpi.com/1424-8220/24/4/1200 (дата звернення: 10.07.2026).

References

1. Kunytska, M. S. (2025). GNSS monitoring of quarry wall deformations during the development of non-metallic mineral deposits. *Technical Engineering,* 2(96), 226–230. Available at: https://ten.ztu.edu.ua/article/view/348269
2. Korenets, O., & Lukiyanchuk, A. I. (2024). Analysis of the current state of development of GNSS observation networks. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military-Special Sciences,* 2(58), 62–67. Available at: https://military.bulletin.knu.ua/uk/article/view/6781
3. Lazorenko, N. (2024). Research on the application of artificial intelligence (GeoAI) for topographic mapping tasks. Spatial Development, 8, 430–443. Available at: https://spd.knuba.edu.ua/article/view/315533
4. Pobihailo, D. P., & Iskov, S. S. (2024). Modern methods for improving GPS positioning accuracy. *Technical Engineering,* 1(93), 415–419. Available at: https://ten.ztu.edu.ua/article/view/308150
5. Shevchuk, S., Domashenko, H., & Rozhi, T. (2024). Modern methods of geodetic mapping of territories: the use of GPS and GNSS technologies. Spatial Development, 8, 506–517. Available at: https://spd.knuba.edu.ua/article/view/315889
6. Parakhnenko, V., Honcharuk, V., Balabak, O., Dekarchuk, M., Dekarchuk, S., Borovyk, P., & Shemiakin, M. (2026). Assessment of the ecological safety of the Ukrainian Polissya region based on landscape-ecological and radioecological approaches under martial law. *Environmental Problems,* 11(1), 50–60. Available at: https://science.lpnu.ua/ep/all-volumes-and-issues/volume-11-number-1-2026/assessment-ecological-safety-ukrainian-polissya
7. Brusak, I. V. (2024). New challenges for the exploitation of continuously operating reference GNSS stations during hostilities: A case study of Ukraine. Geodesy, Cartography and Aerial Photography, 237. Available at: https://science.lpnu.ua/jgd/all-volumes-and-issues/2372024/new-challenges-exploitation-continuously-operating-reference
8. Tretyak, K., Brusak, I., & Babchenko, V. (2024). Recent deformations of the Earth's crust in Ukraine based on GNSS network data from GEOTERRACE and SYSTEM.NET. *Geodynamics,* 37(2), 56–68. Available at: https://science.lpnu.ua/jgd/all-volumes-and-issues/2372024/recent-deformations-earths-crust-ukraine-based-gnss-network-data
9. Danshyna, S., Andrieiev, S., Horelyk, S., Nechausov, A., & Pryima, A. (2024). Geoinformation technologies for engineering and geodetic surveys in the process of modernization of Ukraine's railway infrastructure. *The Current State of Research and Technology in Industry*, 4(30), 39–58. Available at: https://www.itssi-journal.com/index.php/ittsi/article/view/524
10. Yasyukevich, Y. V., Zhang, B., & Devanaboyina, V. R. (2024). Advances in GNSS positioning and GNSS remote sensing. *Sensors,* 24(4), Article 1200. DOI: https://doi.org/10.3390/s24041200

Fomenko V.

GNSS TECHNOLOGIES AND SATELLITE GEODESY OF THE NEW GENERATION

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING 4'26: 242-252.
http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.04.15

Abstract. *This paper presents a narrative review of modern approaches to the application of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) in geodesy and geospatial support. The aim of the study is to summarize current high-precision satellite positioning technologies and to identify the prospects for their application in the context of the digital transformation of the geodetic sector. The review is based on an analysis of scientific publications and official documents devoted to Real-Time Kinematic (RTK), Network RTK (NRTK), Precise Point Positioning (PPP), PPP-RTK, State Space Representation (SSR), the Galileo High Accuracy Service (HAS), as well as the integration of GNSS with unmanned aerial vehicles and geographic information systems. The analysis covers current approaches to high-precision positioning, the use of multi-constellation and multi-frequency GNSS observations, issues of navigation signal integrity and authentication, and the prospects for the development of high-accuracy satellite positioning services.*

The analysis systematized the main characteristics of RTK, NRTK, PPP, and PPP-RTK technologies according to positioning accuracy, convergence time, dependence on ground-based reference infrastructure, spatial coverage, and suitability for operation under different observation conditions. RTK and NRTK provide rapid high-precision positioning when access to reference infrastructure is available, whereas PPP offers greater independence from local reference stations but requires a longer convergence period. PPP-RTK combines the advantages of global PPP coverage with faster convergence through the use of additional correction information. The study also demonstrates that achieving centimeter- or millimeter-level positioning accuracy depends on receiver characteristics, observation duration, satellite geometry and availability, correction quality, and data processing methodology.

The study identifies the use of the Galileo High Accuracy Service (HAS), State Space Representation (SSR) corrections, the integration of GNSS with unmanned aerial vehicles, geographic information systems, and other sensor technologies, as well as the application of machine learning methods to improve positioning reliability, as promising directions for the development of GNSS technologies. The obtained results may be used to select the most appropriate high-precision GNSS positioning technology depending on accuracy requirements, observation conditions,and the availability of reference infrastructure.

Key words: *GNSS technologies, satellite geodesy, GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou, RTK, Network RTK, PPP, PPP-RTK, SSR corrections, Galileo HAS, high-precision positioning, geospatial data.*